

⑨ 日本国特許庁 (JP) ⑪ 特許出願公開
⑫ 公開特許公報 (A) 昭57-183077

⑤Int. Cl.³
H 01 L 31/10

識別記号

府内整理番号
7021-5F

⑬公開 昭和57年(1982)11月11日

発明の数 1
審査請求 未請求

(全 7 頁)

④光検出器

②特 願 昭57-66402

②出 願 昭57(1982)4月22日

優先権主張 ③1981年4月24日③米国(US)
④257355

⑦発明者 チュン・イー・チエン
アメリカ合衆国07076ニュージ
ヤーシイ・ユニオン・スコツチ
・ブレインズ・サンセツト・ブ
レイス1942

⑦発明者 アルフレッド・イー・チヨー
アメリカ合衆国07901ニュージ
ヤーシイ・ユニオン・サミット
・ケネス・コート11

⑦出願人 ウエスター・エレクトリック
・カムパニー・インコーポレー
テッド
アメリカ合衆国10038ニューヨ
ーク・ニューヨーク・ブロード
ウェー222

⑦代理人 弁理士 岡部正夫 外2名

明細書

1. 発明の名称

光検出器

2. 特許請求の範囲

1. 複数の半導体層から成り、少なくともそのいくつかの層は他の層と異なる導電形を有する、光エネルギーを電気エネルギーに変換するための光検出器において、

光検出器は第1の導電形の第1及び第2の層、第1及び第2の層間の第2の導電形をもつ第3の層を含み、それにより第1及び第2の層間に電位井戸が形成され、本質的にドーピングされていない第4の層が、第3の層に隣接して配置され、光を吸収し電流キャリアを発生させ、電流キャリアのある程度は電位井戸に移動することを特徴とする光検出器。

2. 特許請求の範囲第1項に記載された光検出器において、

第4の層は第3の層及び第2の層間に配置され、本質的にアンドープの第5の層が第1層及び第3層間に配置されることを特徴とする光検出器。

3. 特許請求の範囲第2項に記載された光検出器において、該第3の層は $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上のキャリア濃度を有することを特徴とする光検出器。

4. 特許請求の範囲第3項に記載された光検出器において、該第3の層は 100 オンケストローム又はそれ以下の厚さを有することを特徴とする光検出器。

5. 特許請求の範囲第4項に記載された光検出器において、
該第4及び第5の層は $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 以下のキャリア濃度を有することを特徴とする光検出器。

6. 特許請求の範囲第2項に記載された光検出器において、

該第4の層は少くとも 1 μm の厚さであ

ることを特徴とする光検出器。

7. 特許請求の範囲第1又は第2項に記載された光検出器において、

該半導体層はII-V族及びIII-V族化合物及び各々の混合物から選択される化合物から成ることを特徴とする光検出器。

8. 特許請求の範囲第7項に記載された光検出器において、

該第1、第5及び第3の半導体層はGaAsから成り、該第4及び第2の半導体層は $Al_xGa_{1-x}As$ から成ることを特徴とする光検出器。

9. 特許請求の範囲第8項に記載された光検出器において、

該第1の伝導形はn形であることを特徴とする光検出器。

10. 特許請求の範囲第9項に記載された光検出器において、

該n形ドーパントはシリコンであることを特徴とする光検出器。

11. 特許請求の範囲第1項に記載された光検出器において、

第4及び第2の半導体層は第1の半導体層の禁制帯より小さい禁制帯を有することを特徴とする光検出器。

3. 発明の詳細な説明

本発明は複数の半導体層から成り、少くともいくつかの層は他とは異なる伝導形を有する光エネルギーを電気エネルギーに変換するための光検出器に係る。

石英を基礎とした光ファイバを用いる光伝送システムの開発は、そのようなシステムに関連した一般に約 $7\mu m$ (ミクロン)及び約 $1.6\mu m$ の間の波長領域内で動作する光源及び光検出器に対する関心をひき起してきた。光検出器はそのようなシステムの本質的な成分であり、その結果光検出器の構造及び材料の開発に、多くの努力が払われてきた。

ファイバを基礎とした光伝送システムに現在適用が考えられている光検出器は、一般的

に3つに分類される。第1はp-i-n型オトダイオードである。しかし、これらは電流利得がないという欠点をもつ。第2になだれオトダイオードが開発され、これらはもちろん電流利得をもつ。しかし、なだれプロセスは多くの伝送システムに好ましくない雑音を導入する。更に、典型的な場合30ボルト以上の大きなバイアス電圧が、なだれを起すために通常必要である。第3に、高感度オトトランジスタが開発された。しかし、これらのデバイスは一般に、光伝送システムが動作し、かつ高利得が最も必要とされる低入射パワー領域で、光利得が低い。更に、オトトランジスタの応答時間は、ベース領域中の少数キャリアの蓄積により、所望の速さに比べしばしば遅い。

先の問題は本発明の多層半導体光検出器により解決される。本発明による多層半導体検出器は、光検出器が第1の伝導形の第1及び第2の層を含み、第2の伝導形の第3の層が

第1及び第2層間にあり、それにより第1及び第2層間に電位井戸が形成され、電流キャリアを発生させるため、光の吸収用に本質的にドープをしてない第4の層が第3の層に隣接して配置され、電流キャリアのかなりの部分は電位井戸に移動することを特徴とする。

出願人は以下の順序で配置された層から成る光検出器は、速い応答時間をもつことを見い出した。すなわち、第1の伝導形を有する第1の半導体層13、アンドープの第5の半導体層11、第2の伝導形を有しつつ高ドープで薄い第3の半導体層9、アンドープの第4の半導体層7及び第1の伝導形を有する第2の半導体層5である。高感度もまた得られる。第1及び第5の層13及び11は、これらの層が対象とする放射に対し透明であるような禁制帯幅を有し、一方第4の層7はそれが入射放射を吸収するような禁制帯幅をもつ。すなわち、第4及び第2層7及び5は第5の層11の禁制帯より大きな禁制帯をもつ。第

3層9はまたそれが入射放射を吸収するような禁制帯をもつてもよい。層の厚さ及びドーピングレベルは、層が第2の伝導形を有し、二つのアンドープ層、すなわち層11, 9, 7は熱平衡において、完全に空乏化するよう選択される。出力は電極17及び19から得る。

好ましい実施例において、第1の伝導形はn形である。約8ミクロンの入射光波長で動作する好ましい実施例において、層5, 7及び9はGaAsから成り、層11及び13はAl_xGa_{1-x}Asから成る。xは層が格子整合し、デバイス前面が照射された時、入射放射に対する窓として働くよう選択される。シリコン及びペリリウムがそれぞれn形及びp形のドーパントとして用いられる。更に好ましい実施例において、層7は対象となる本質的にすべての入射を吸収するのに十分な厚さを有する。-

本発明の光検出器は、典型的な場合、最大

値の半分において全幅が600 psec以下と速い応答速度と、500 Amp/W以上の高感度をもつ。

層5は通常比較的低品質の基板ではなく、高品質の層上に更にエピタキシャル層が追加して成長できるように、ふつう成長されるバツファ層である。もし、バツファ層を省くと、基板は第1の半導体層と等価になる。層7, 9及び11はまた、それぞれドレイン、ゲート及びソースとよばれる。

デバイスは通常分子ビームエピタキシーメビEにより製作される。適当なMBEシステムについては、アルフレッド・ワイ・ヨーに1979年2月6日に承認された米国特許第4,137,865号に十分詳細に述べられており、当業者に本発明のエピタキシャル層及び光検出器の製作法を教えるものである。電極は周知の通常の技術で作られる。メサ構造は層15とともに、周知の一般的なエッティング及びリソグラフィ技術で作られる。デバイ

スは他の技術によつて製作してもよい。

第1の伝導形はn形又はp形でよい。以下で詳細に述べる具体例ではn形を選んだが、それはレーザー及び電界効果トランジスタFETのような他の型のデバイスと、モノリシック構造に容易に集積化できるからである。第1の伝導形の選択によつて、デバイス特性も異なつてくる。一般に、n形が第1の伝導形であると、第1の伝導形がp形であるデバイスに比べ、より高感度であるが応答速度は遅くなる。

好ましい層厚及びドーピング濃度は、以下のように得られる。層7及び9すなわちゲート及びドレイン領域は、入射放射の本質的にすべてを吸収するのに十分な厚さをもつ必要がある。対象となるほとんどの半導体及び波長の場合、層7は少くとも1μmの厚さにすべきである。もちろん、より薄い層も使用できるが、ある程度の入射フォトンは吸収されずゲート及びドレインの両方を通過するであ

ろうから、デバイスの感度が下るか又は層5あるいは基板中での光吸収により、拡散ティルが生じる。

層7, 9及び11から成る半導体は、障壁高さ ϕ_B は価電子帯のエネルギーレベル E_V がフェルミレベルエネルギー E_f と交わらないように選択されるように選ばれる。事実、 E_V は十分な光検出動作のために、 E_f から少くとも数kT離れているべきである。もしこの条件が満されないと、層9は完全に空乏化できない。障壁高さは関係式 $\phi_B = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \frac{Q_s}{E_s}$ により、ほぼ決定される。ここで、 L_1 及び L_2 はそれぞれソース及びドレインの厚さ、 Q_s は層9中のキャリア/cm²数、 E_s は層9の誘電率である。一般に、デバイス効率は ϕ_B が小さいほど増加するが、暗電流も増加する。従つて、 ϕ_B を正しく決定することは、感度と暗電流間の妥協点をとることになる。

層7, 9及び11は熱平衡で完全に空乏化

するような厚さ及びドーパント濃度が選択される。光検出器がすべてのバイアス電圧で、多数キャリアアーバイスであるように、これらの層は熱平衡で完全に空乏化することが望ましい。層9は薄くかつ高濃度ドープにすべきである。高濃度ドープというのは、アンドープ層との比較で用いられ、少くとも $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア濃度を意味する。層は所望の障壁高さを得るために、高濃度ドープにすべきである。薄いということは、熱平衡で層9が完全に空乏化することを意味する。完全に空乏化するための最大の厚さは、一般に100オングストロームかそれ以下である。層9がより厚くなるにつれ、アンドープ層はより薄くなる。層7及び9に対して用いたアンドープという用語は、故意にドープしておらず、通常はp形でこれらの層中のバツクグラウンド濃度が $5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 以下、通常は $8 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 以下であることを意味すると理解すべきである。より低濃度の方が望ましいが、そ

れはアンドープ及び高ドープ層の両方を空乏化しやすいためである。層7, 9及び11中の全ドーパント濃度は、内部電界が熱平衡で層を完全に空乏化しうるよう十分小さくなければならない。

半導体層は相互に格子整合のとれる任意の半導体材料、すなわち0.1パーセント以下の差しかない格子定数をもつ材料で構成してよい。たとえば、II-V族又はII-V族化合物半導体及びそれらの混合物が使用できる。もし、II-V化合物を用いるならば、第4及び第5層はAlGaAsでよく、一方第1, 第2及び第3の層は基板とともに、GaAsでよい。格子整合のとれた組成はGaAsとそれと格子整合がとれるよう周知のように選択されたXをもつ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ である。例として、Xは.2又は.3及びそれらの間の値でよい。

AlGaAs及びGaAsの好ましい実施例において、シリコン及びペリリウムがそれぞれn形及びp形ドーパントとして用いられる。ほと

んどのAlGaAs/GaAsレーザ製作に用いられるスズでなく、シリコンを選ぶのは通常と異なる。しかし、シリコンは多数キャリア光検出器に望ましい急峻なドーピングプロファイルをもたらすため、ドーパントとして適している。

本発明について、AlGaAs及びGaAsで作られた光検出器を例にして述べる。第1の伝導形がn形である場合のこれら光検出器の典型的な層厚及びドーピング濃度は、以下の通りである。層5, 2 μm ; 層7, 2 μm ; 層9, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 及び60オングストローム; 層11, 500ないし2000オングストローム; 層13, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 及び.6ないし2 μm ; 層15, $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及び, 3 μm 。アンドープ層はp形のバツクグラウンドキャリア濃度 $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ を有した。これらの値は熱平衡で層7, 9及び11を空乏化させる。

第2図は熱平衡におけるAlGaAs/GaAs光検出器のエネルギー帯構造を示す。わかりや

すくするため、層の厚さは実際の比率通りには描かれていない。先に述べた実施例の層の組成及び入射フォトンの方向も示されている。

デバイスの動作について、簡単に述べる。n形基板をもつデバイスは、基板及びドレインを窓又はソース層に対して正にバイアスして動作させる。光源(図示されていない)は層11及び7の禁制帯エネルギーの中間のエネルギーをもつフォトンを放射し、ゲート及びドレインは同じ組成をもつと仮定する。フォトンは基本的にはドレイン領域であるが、ゲート及びドレイン領域の両方で吸収され、電子-正孔対が発生し、ドレイン領域内に存在する電界により分離される。電位極小値又は層9におけるポテンシャル井戸へ移動する正孔は、直ちに電位障壁を経験し、正孔の一部は電位極小値に蓄積する。もし蓄積が十分長時間続くとすると、入ってくる正孔流の割合が出ていく正孔流の割合に等しくなつた点で、定常状態に達する。後者の正孔流は電子

との再結合又は電位障壁を越える熱放射によるものである。蓄積した正孔は伝導帯の電位障壁を下げる、多数キャリアをなす電子のソースからの放出を増加させる。一般に弱い入射放射の場合にあってはまるような、暗電流に比べ電流が小さい光発生の場合、光利得を記述する以下の式を得た。
$$G = \frac{J_d (h\nu)}{p_i q} \left[\exp(q\phi_B/kT) - 1 \right]$$
 この式において、 J_d は単位面積当たりの暗電流、 p_i は単位面積当たりの入射パワー、 $q\phi_B$ は入射放射による障壁の低下である。他のパラメータは先に述べた意味をもつ。入射パワーが増すにつれ、障壁の低下量 ϕ_B は徐々に飽和し、光利得はパワーの増加に伴い徐々に減少する。すなわち、デバイス感度は入射パワーが減少するにつれ増加する。

通常の動作状態下における多数キャリア光検出器中のキャリア輸送は、基本的には電位障壁を越えた多数キャリアの熱放射による。通常の動作状態というのは、n形及びp形基

は約 $1.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ の面積をもつ長円形であつた。感度及び光利得はそれぞれ左及び右側の縦軸にプロットされている。第3図に示される測定は、光検出器を50オームストリップ線上にマウントし、光源として8300アンペアストロームの光を放射するAlGaAs/GaAs注入レーザを用いて行つた。感度測定は較正曲線を用いて直接行つた。光利得は式 $G = S(h\nu)/q$ により感度と関係しており、 $h\nu$ は入射フォトンエネルギー、 q は電子電荷である。入射パワーレベルが減少するにつれ、光利得が増加することに注意すべきである。1.5 mW の入射パワーの場合に、100という高い利得が得られた。この結果はこれまで報告されたあらゆるフォトトランジスタの光利得より良い。

感度はバイアス電圧の増加とともに増加するが、暗電流もまたバイアス電圧の増加とともに増加することに注意すべきである。従つて、最適のバイアス電圧は、光伝送システム

板の場合、ソースに対しドレインがそれぞれ正及び負であることを意味する。バイアス電圧は典型的な場合、5ないし10ボルトの間である。

たとえばペーテにより、熱放射は実際に電位極大値に向つて動いているすべてのキャリアが、衝突ではなく電位により止められた時優勢となることが示されている。言いかえると、このことは電位エネルギーが kT により変化する距離が、運動量が無秩序の衝突の場合の平均自由行程より小さい必要があることを意味する。この仮説はn形AlGaAs/GaAs光検出器の場合の $\log I$ 対 V の直線関係によつて確認された。

第3図はn形第1伝導形のAlGaAs/GaAs光検出器の5ボルト及び7ボルトバイアスの両方の場合についての、感度及び光利得の入射パワー依存性を示す。デバイスパラメータは先に述べた通りで、層11及び13はそれぞれ $0.05 \mu\text{m}$ 及び $0.6 \mu\text{m}$ の厚さを有した。メサ

が許容できる暗電流の大きさに依存する。

利得は暗電流に比例し、もし暗電流がバイアスのふらつきとともに著しくふらつくと、デバイスの安定性が減少するため、比較的一定の暗電流での動作が重要である。暗電流の大きさは、ソース及びドレインの相対的な厚さにより制御される。これらの条件、すなわちドレイン及びソース厚は、著しく非対称なI-V特性を生ずる。層の厚さに関してすぐ上で述べた考えからは、バイアス電圧の小さなふらつきに対して比較的鈍感な暗電流が得られる。

n形が第1の伝導形であるAlGaAs/GaAs光検出器の応答時間は、先に述べたレーザーからのピークパワー 20 mW を有する 40 psec のパルスで調べた。立ち上がり時間は約 50 psec であつた。立ち下がり時間は約 600 psec であつた。立ち下がり時間はRC時定数で制限されると信じられる。p形が第1の伝導形であるAlGaAs/GaAs光検出器はn形光検出器

の相補型のものであるが、同様に調べたところ、最大値の半分における全幅は 6.0 psec の応答時間であった。

具体的に述べたもの以外の実施例も可能である。たとえば、光検出器は裏面から照射してもよく、立ち下り時間が改善される。この場合、基板 3 及び層 5 及び 7 は入射放射に対して透明となる。また、半導体層を成長させる順序は、第 5、第 4、第 2 及び第 1 の順である。更に、InGaAs/InP 系も 1.3 μm 付近に感度をもつ光検出器の製作に使用できる。

出願人は二つの参考文献を記すことを望むが、それらは表面的には構造が本発明と似ているものの、光検出器ではない。アプライド・フィジクス・レターズ (Applied Physics Letters) 35, 63-65 頁, 1979 年 7 月 1 日は多数キャリアデバイスについて報告しているが、著者はらくだダイオードと呼んでいる。そのデバイスはキャリアの輸送を制御する薄くかつ高濃度ドープ p 形層により形成される

伝導帯中に、ごぶがあるためそう呼ばれている。この層中のドーピング濃度は、すべてのバイアス値で正孔が完全に空乏化するようなものである。このデバイスの別の点については、エレクトロニクス・レターズ (Electronics Letters), 16, 836-838 頁、1980 年 10 月 23 日に報告された。このデバイスは各目上アンドープである半導体層間に閉じ込められたキャリアの輸送を制御する p 形層を有する。

しかし、両方の文献に報告されているデバイスは、電気的に整流素子であり、光検出器ではない。後者の文献はそのデバイスがミキサダイオードとして使用できることを示唆されておらず、そのデバイスは光検出器としての用途に適していないと、両方の文献で述べられている。

4. 図面の簡単な説明

第 1 図は本発明の光検出器の一実施例の断面図。

第 2 図は本発明の光検出器の一実施例のエネルギー帯図。

第 3 図は一光検出器の光利得と感度を、2 つの異なるバイアスについての異なる入射パワーレベルの関数として示した図である。

〔主要部分の符号の説明〕

第 1 の層	………	1 3
第 2 の層	………	5
第 3 の層	………	9
第 4 の層	………	7
第 5 の層	………	1 1

出願人 ウエスター・エレクトリック
カムバニー、インコーポレーテッド

代理人 岡 部 正 夫 
安 井 幸 一 
栗 林 貢 

